



Optimisation des systèmes multi-physiques

Par une approche stochastique

Application au domaine de l'hydraulique de forte puissance



Réalisé par : BOUCHARI Houda

Encadré par : Mme. EL MKHALET Mouna

Plan :

1. Introduction :

- ✓ Justification du choix
- ✓ Problématique
- ✓ Solution

2. Méthode d'Optimisation Globale pour la Calibration des Paramètres (MOGCP)

- ✓ Présentation
- ✓ Fonction objective (FO)
- ✓ Spécification de la solution recherchée

3. Les méthodes d'optimisation stochastiques

4. Algorithme génétique :

4.1 AG en général

- ✓ Définition
- ✓ Operateurs d'évolution

4.2 AG adapté à la MOGCP

5. Application de la MOGCP à un circuit hydraulique

- ✓ Individus de la population
- ✓ Initialisation de la population
- ✓ FO
- ✓ Résultats théoriques
- ✓ Analyse des résultats

6. Elargissement (Algorithme génétique hiérarchique)

7. Application au Maroc

- ✓ Secteur d'application
- ✓ Entreprises concernées

8. Références

INTRODUCTION :

Durant les deux dernières décennies, de nombreuses recherches ont été menées dans le domaine d'optimisation énergétique des systèmes multi-physique. En fait l'énergie est trop précieuse pour être gâchée et la réduction de la consommation de carburant s'accompagne d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre et des coûts d'exploitations de l'utilisateur du véhicule. Les USA, l'Europe et le Japon ont investi de grands capitaux dans ce domaine, ce qui a eu pour conséquence de faire émerger de nombreuses solutions de qualité pouvant être appliquées à la construction d'engins. Certaines solutions tendent à récupérer l'énergie par le biais de systèmes de stockage, par l'optimisation complète des constituants, par l'automatisation des engins afin de mieux gérer les flux d'énergie, et par la modification de l'architecture des circuits hydrauliques.

Dans le but **d'améliorer le bilan énergétique des engins mobiles de forte puissance destinés au génie civil**. Une étude a été consacrée à l'utilisation des méthodes numériques de simulation en vue d'optimiser la consommation des engins de forte puissance mais l'application des méthodes numériques conventionnelles présente toutefois certains risques tels que l'obtention d'une solution optimale locale et non pas globale et requiert parfois de lourds temps de calculs. Par conséquent, il semble important de trouver **une méthode stochastique** alternative plus précise et plus rapide.

Parmi les méthodes stochastiques envisageables, **l'algorithme génétique** est un bon candidat. En effet, c'est un outil puissant pour résoudre les problèmes d'optimisation vu sa capacité à être automatisé, sa grande robustesse et sa faculté à trouver une solution optimale globale. On distingue deux types des AG :

- Algorithme génétique
- Algorithme génétique hiérarchique à deux niveaux

JUSTIFICATION DU CHOIX :

L'hydraulique de forte puissance est une partie intégrante du génie civil, plus précisément le génie civil écologique, l'hydraulique à une place déterminante dans la compréhension, l'analyse et le diagnostic des réseaux d'adduction d'eau potable, des stations de traitements et des réseaux d'assainissement.

PROBLEMATIQUE :

L'application des méthodes numériques conventionnelles présente certains risques tels que l'obtention d'une solution optimale locale et non pas globale et requiert parfois de lourds temps de calculs.

Alors comment peut-on remédier ce problème !

SOLUTION :

L'application de l'algorithme génétique vu que c'est un outil puissant pour résoudre les problèmes d'optimisation grâce à sa capacité à être automatisé, sa grande robustesse et sa faculté à trouver une solution optimale globale.

2.Méthode globale optimisée :

2.1 présentation :

La modélisation du comportement physique de tout système multi physique nécessite habituellement la définition d'un grand nombre de paramètres. Les valeurs de ces paramètres sont établies par des mesures directes ou indirectes.

On s'intéresse ici aux **circuits hydrauliques des engins de chantier de forte puissance**. En général, ces circuits tels que les pelleteuses sont caractérisés par plusieurs paramètres difficilement quantifiables. D'autant plus que certains paramètres varient en fonction du temps, des températures internes et externes, et de la consommation énergétique du système tels que les rendements des composants, la viscosité du fluide, les géométries et dimensions des composants mécaniques qui changent avec l'usure, etc. **Les valeurs de ces paramètres représentent habituellement les valeurs locales et non globales** et ne tiennent pas en compte des interactions entre les constituants du système et leurs influences réciproques. Ainsi, ces valeurs ne représentent plus le véritable fonctionnement du système d'un point de vue global.

De ce fait, il devient nécessaire de trouver une solution pour compenser les imprécisions en identifiant les valeurs inconnues des paramètres qui ne

peuvent pas être facilement mesurées, d'où la nécessité du **recalage(correction)**.

Le recalage de modèle est une nécessité pour de nombreuses raisons :

- ✓ Modéliser un fonctionnement du système représentatif de la réalité
- ✓ Améliorer l'efficacité du système et sa régulation
- ✓ Simuler le système en réponse aux commandes de l'opérateur

Généralement, les valeurs inconnues des paramètres d'un système sont calibrées en résolvant **un problème d'optimisation sous contrainte pour lequel une Fonction Objective (FO) doit être minimisée ou maximisée.**

La fonction objective est définie comme la moyenne des ratios des différences entre les sorties physiques simulées et celles de référence (ou expérimentales) Cette fonction doit être réduite au minimum de sorte que les sorties de simulation convergent vers les sorties expérimentales.

Le calcul de la FO est exprimé comme suit :

$$FO = \frac{1}{s} * \sum_{k=0}^s (\frac{1}{n} * \sqrt{\sum_{i=0}^n \frac{(X_{sim}^{ki} - X_{exp}^{ki})^2}{(X_{exp}^{ki})^2}})$$

Où s est le nombre total de sorties de simulation évaluées, n est le nombre total de pas de simulation, X est la sortie physique mesurée telle que la pression, le débit, le déplacement, la vitesse, l'accélération, etc.), X_{sim}^{ki} est la valeur simulée de la $k^{ième}$ sortie de simulation au $i^{ème}$ pas de simulation et X_{exp}^{ki} est la valeur expérimentale de la $k^{ième}$ sortie de simulation au $i^{ème}$ pas de simulation.

Cette FO est soumise à deux contraintes :

1) Une contrainte d'inégalité :

Les paramètres calibrés sont bornés comme suit

$$O_i \min \leq O \leq O_i \max$$

Où O_i est le i -ème paramètre calibré, $O_i \min$ et $O_i \max$ sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de O_i .

2) Une contrainte d'égalité :

La variation de la courbe de la sortie physique varie en fonction du temps et des valeurs des paramètres calibrés tel que :

$$(X_1, \dots, X_k) = f(O_1, \dots, O_i, t)$$

Où X_k est la k-ème sortie physique, O_i est le i-ème paramètre calibré et t est le temps

Dans cette partie, nous présentons une méthode globale qui tend à recalculer tout circuit hydraulique. Cette méthode est nommée :

" Méthode d'Optimisation Globale pour la Calibration des Paramètres " (MOGCP).

Cette dernière doit respecter trois spécifications.

Spécification de la solution recherchée :

Cette solution doit vérifier trois conditions :

1. Simplicité

Les systèmes hydrauliques des engins de chantier sont des circuits complexes, multi-domaines et non linéaires. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de chercher la méthode de recalage de modèle la plus simple et automatique pour pouvoir calculer la FO et résoudre ce problème d'optimisation.

2. Globalité

L'application des méthodes numériques conventionnelles présente certains risques tels que l'obtention d'une solution optimale locale et non pas globale et requiert parfois de lourds temps de calculs. C'est ce qui a en partie conduit à l'émergence de **méthodes numériques stochastiques tels que l'Algorithme Génétique**

3. Efficacité et précision avec le minimum de calcul

La méthode proposée doit être un compromis entre le nombre, le coût, et l'exactitude des résultats attendus.

2.2 les méthodes d'optimisation stochastiques :

Les méthodes stochastiques et heuristiques, appelées aussi méthodes d'optimisation probabiliste ou optimisation robuste.

Ces méthodes ont été développées pour prendre en compte l'incertitude et l'aléatoire à travers une modélisation statistique et une analyse probabiliste afin d'optimiser un système ou de trouver une solution approchée à un problème.

Ces

approches complètent les approches déterministes mais requiert de grandes ressources informatiques pour être traitées. En effet, elles s'appuient sur des algorithmes itératifs testant de façon aléatoire de nombreuses configurations de paramètres au regard de critères de performance. L'avènement des nouveaux moyens matériels et logiciels de calcul parallélisé à haute performance a fortement accru l'utilisation des méthodes stochastiques.

Parmi Les méthodes d'optimisation stochastiques les plus répandues on trouve :

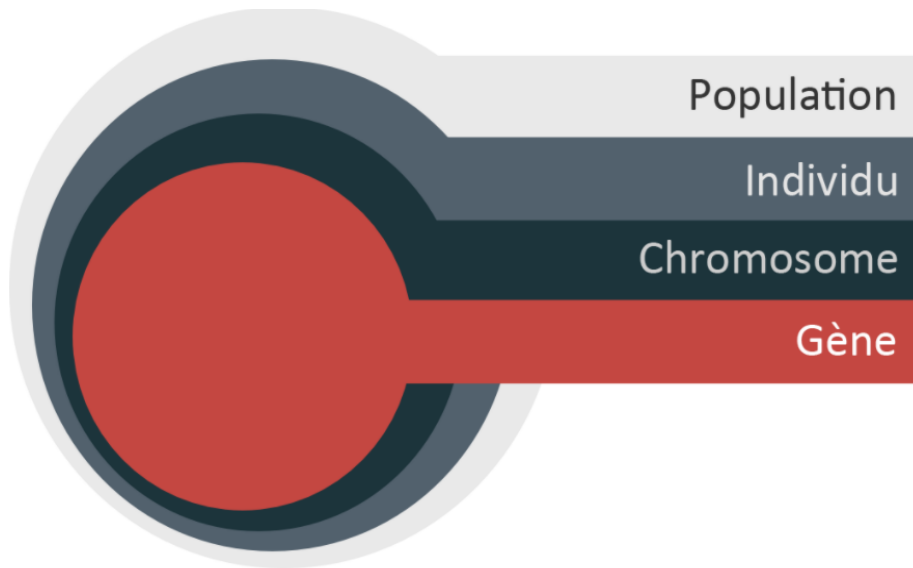
- Méthode de Monte Carlo
- Algorithmes basés sur le principe de l'évolution :
 1. Les algorithmes génétiques
 2. Les algorithmes mimétiques
- Les méthodes réactives de recherche d'optimisation :
 1. Le recuit simulé
 2. Recherche Tabou
 3. Méthode de l'entropie croisée

Dans notre étude on va se focaliser sur les algorithmes génétiques

2.3 algorithme génétique :

2.3.1 algorithme génétique en général :

Les algorithmes génétiques sont une des méthodes stochastiques (aléatoires) et heuristiques (approximatives) les plus utilisées. Ils appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes. Leur but est d'obtenir une solution approchée à un problème d'optimisation, lorsqu'il n'existe pas de méthode déterministe (ou que la solution est inconnue) pour le résoudre en un temps raisonnable. Les algorithmes génétiques utilisent la notion de sélection naturelle et l'appliquent à une population de solutions potentielles au problème donné au regard de critères de performance. La solution est approchée par « bonds » successifs



- La **population** est l'ensemble des solutions envisageables.
- L'**individu** représente une solution.
- Le **Chromosome** est une composante de la solution.
- Le **Gène** est une caractéristique, une particularité.

❖ Les opérateurs d'évolution :

Il y a trois opérateurs d'évolution dans les algorithmes génétiques :

➤ La sélection :

La sélection consiste à choisir les individus les mieux adaptés afin d'avoir une population de solution la plus proche de converger vers l'optimum global. Cet opérateur est l'application du *principe d'adaptation* de la théorie de Darwin.

On cite 4 techniques de sélection :

♦ Sélection par range :

Choix des individus possédant les meilleurs scores d'adaptation

♦ Probabilité de sélection proportionnelle à l'adaptation :

La probabilité d'être sélectionné est proportionnelle à son adaptation au problème.

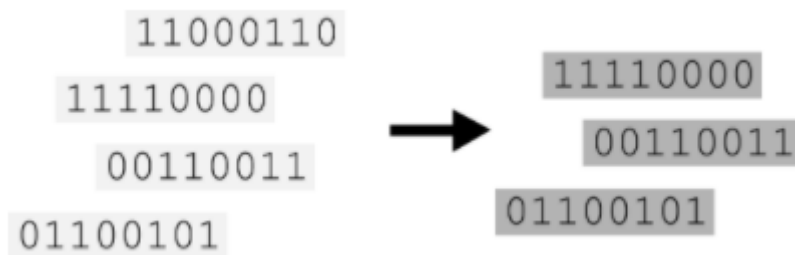
♦ Sélection par tournoi :

Cette technique utilise la sélection proportionnelle sur des paires d'individus, puis choisit parmi ces paires l'individu qui a le meilleur score d'adaptation.

♦ Sélection uniforme :

La sélection se fait aléatoirement, uniformément et sans intervention de la valeur d'adaptation.

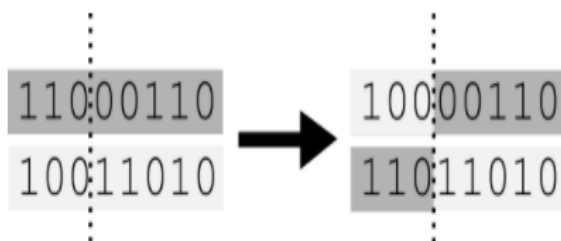
Exemple :



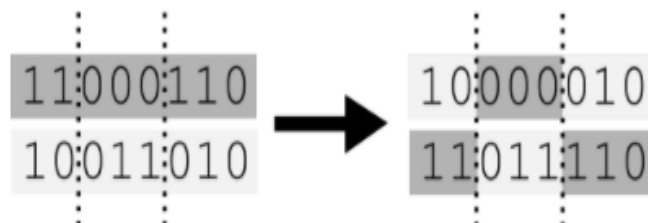
➤ Le croisement : (ou enjambement)

Est le résultat obtenu lorsque deux chromosomes partagent leurs particularités. Celui-ci permet le brassage génétique de la population et l'application du *principe d'hérédité* de la théorie de Darwin.

♦ Enjambement simple :

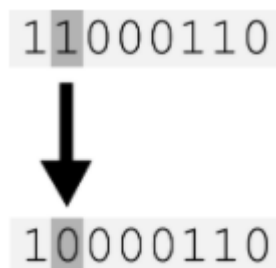


♦ Double Enjambement :

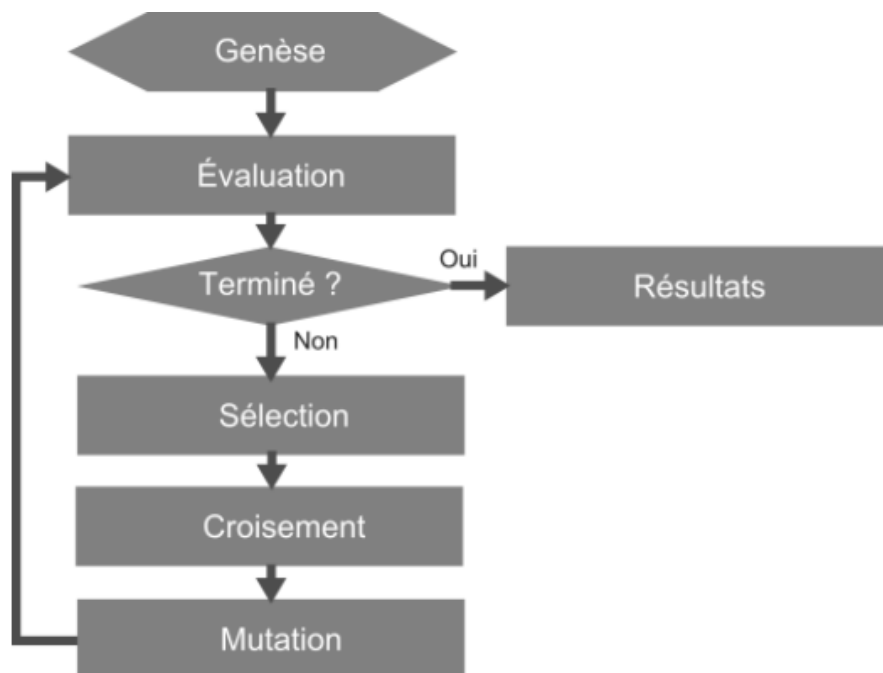


➤ La mutation :

Altération aléatoire des particularités d'un individu.



❖ Algorithme :



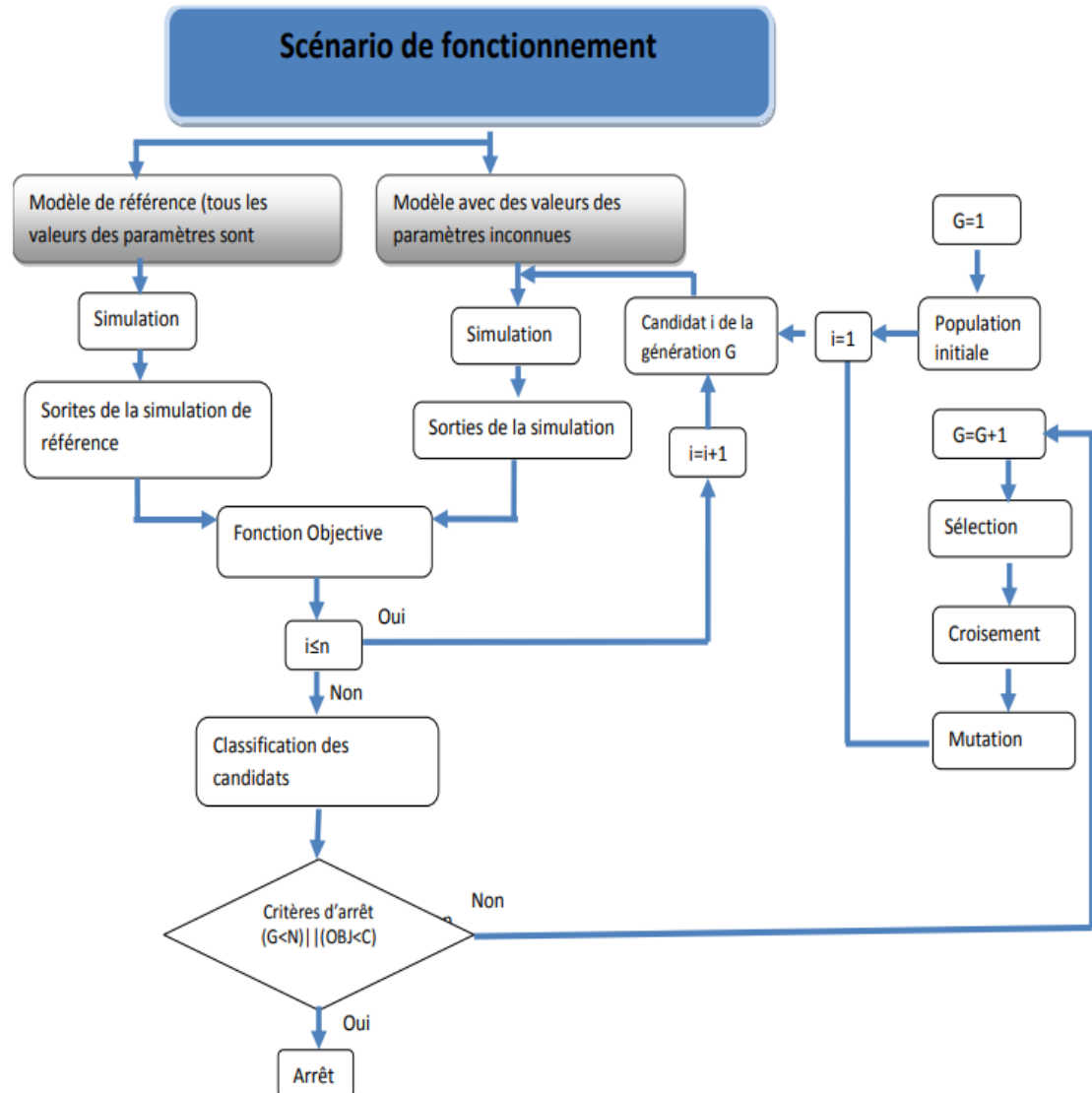
- La genèse est l'étape de la création d'une population aléatoire. C'est le point de départ de notre algorithme
- L'évaluation est l'analyse des individus pour analyser si une solution est disponible. Pour ceci, nous utilisons une fonction de coût, ou d'erreur, afin de définir le score d'adaptation des individus lors du processus de sélection.
- Nous effectuons une boucle tant que l'évaluation estime que la solution n'est pas optimale.

2.2.2 Algorithme génétique adapté à la MOGCP :

Les étapes suivies par l'AG sont :

1. Générer une population de candidats dans laquelle le candidat est un ensemble de valeurs de paramètres tirées au sort dans des intervalles prédéfinis au début de la simulation. Où n représente le nombre de candidats dans une population.
2. Lancer plusieurs simulations du circuit modélisé en y injectant les valeurs des paramètres attribués à un candidat. Chaque simulation constitue une itération. Dans chaque itération, un candidat différent est testé
3. Calculer la valeur de la FO de chaque candidat en comparant les sorties physiques expérimentales ou de la simulation de référence avec celles issues des simulations itératives.
4. Classer les candidats par ordre croissant de valeurs de FO.
5. Créer une nouvelle population en sélectionnant les candidats ayant les plus petites valeurs de FO et en utilisant des opérations de sélection, croisement et de mutation

6. Répéter les étapes 2, 3, 4, 5 jusqu'à atteindre les conditions d'arrêt : seuil d'erreur globale toléré ou jusqu'à ce que le nombre de génération atteigne une valeur prédéfinie N afin de limiter le temps de calcul en cas de non convergence.



Où :

n : le nombre de candidats de chaque population

I : le numéro du candidat traité

G : le nombre de générations

FO : la fonction objective

N : le nombre limité de génération, C'est la valeur de l'erreur tolérée et donc le critère d'arrêt à atteindre.

Application de le MOGCP à un circuit hydraulique :

a. Les individus de la population :

Les individus de la population représentent les paramètres à recalculer. Dans notre cas :

- ✓ Le coefficient de débit du distributeur (cdd)
- ✓ Coefficient de débit du limiteur de pression (cdl)
- ✓ Le couple de décollement de la rotation de la tourelle (cdr)
- ✓ Le couple de frottement de Coulomb de la rotation du corps de la tourelle (cfc)
- ✓ Le moment d'inertie de la tourelle (mit)
- ✓ Le rapport de transmission (rt)
- ✓ La longueur de la canalisation hydraulique (lc)
- ✓ Le rendement volumétrique de la pompe (rvp)

b. Initialisation de la population :

L'initialisation de la population est le processus de génération des ensembles de valeurs initiales des paramètres de la première population de l'AG. Deux types de méthodes, **aléatoire et heuristique**, sont utilisés pour initier la population.

Nous optons pour la méthode heuristique qui exige une certaine **connaissance préalable des intervalles de valeurs réalistes**, et, par conséquent, elle offre la solution optimale la plus rapide

Les plages de valeurs sont estimées en tenant compte de leur signification physique et grâce à l'expérience des experts hydrauliciens.

	cdr (N*m)	rt	cfc (N*m)	rvp	mit (kg*m²)	lc (cm)	cdd	cdl
Valeur de référence	75	6	75	0.92	4100	20	0.7	0.7
Borne inférieure	75	4	40	0.7	4080	10	0.5	0.5
Borne supérieure	100	9	75	1	4130	30	0.9	0.9

❖ La fonction objective :

Pour appliquer la FO, il est nécessaire d'identifier :

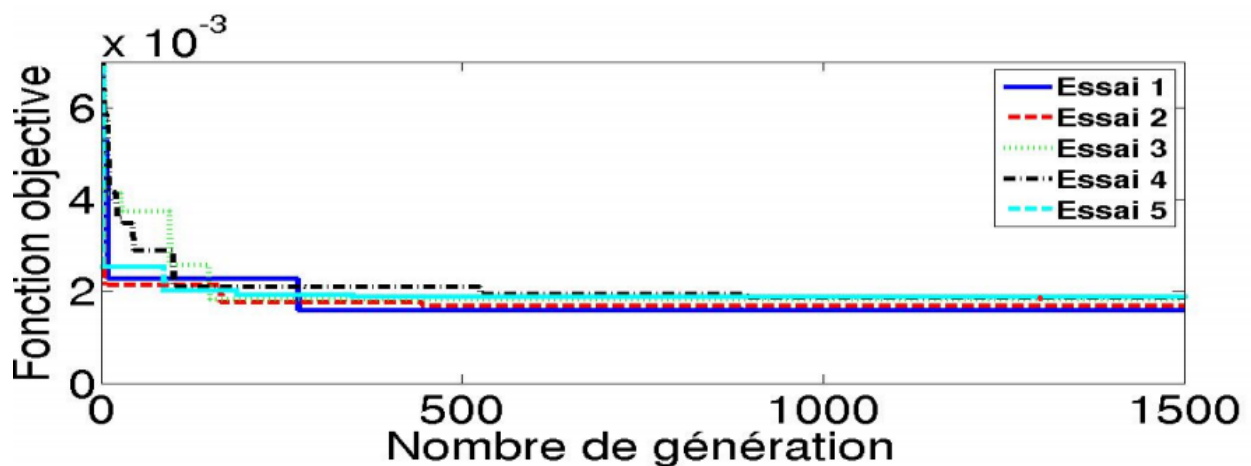
1. les sorties physiques qui doivent être mesurées. Dans notre application : les pressions à la sortie et à l'entrée de chaque voie du distributeur, le débit de la pompe, l'angle de rotation et la vitesse de rotation de la tourelle.

2. critère d'arrêt :

- i. L'AG doit s'arrêter quand la valeur de la FO est inférieure à une valeur prédéfinie (cette valeur a été fixée par savoir-faire à 0.001)
- ii. L'AG doit s'arrêter quand le nombre de générations dépasse un nombre prédéfini (cette valeur est égale à 100).

❖ Résultats théoriques obtenus en appliquant la méthode MOGCP :

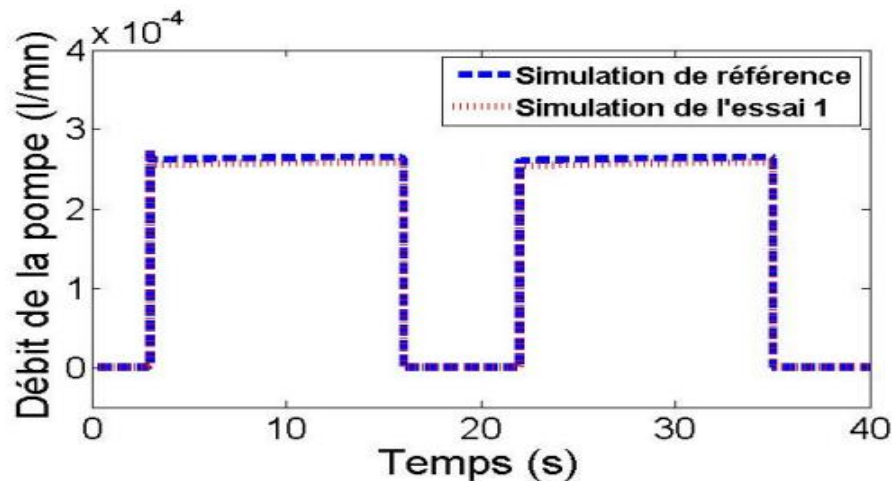
Plusieurs tests ont été lancés avec différentes populations initiales. Chaque test était le résultat de **1 500 générations**. Et, dans chaque génération, **40 individus** ont été évalués en calculant leurs FO. Tant que les critères d'arrêt n'étaient pas atteints, l'AG continuait de répéter le processus en boucle. Une fois le processus terminé, les valeurs retenues par l'AG ont permis d'identifier les valeurs recherchées.



→ Analyse des résultats :

D'après ce tableau, nous pouvons constater que la valeur de la FO du test 1 est la plus petite valeur parmi celles des cinq essais. De ce fait, **l'essai 1 est donc le meilleur test**, et les valeurs retrouvées par ce dernier sont les valeurs optimales recherchées.

	cdr (N*m)	rt	cfc (N*m)	rvp	it (kg*m ²)	lc (cm)	cdd	cdl	FO
Vrai valeurs	75	6	75	0.92	4100	20	0.7	0.7	0
Essai 1	84	6	75	0.9	4118	19	0.7	0.6	0.0015977



Les résultats de cette application attestent la performance et la robustesse la MOGCP (une **précision moyenne de l'ordre de 96%.**)

Cependant, l'augmentation du nombre de valeurs à recalculer tend à rendre moins efficace l'AG en termes de précision et à augmenter les temps de calcul nécessaires avant convergence !

C'est ainsi que sont apparus les concepts d'AG combinés et notamment les **Algorithmes Génétiques Hiérarchiques (AGH).**

❖ Élargissement :

Algorithme Génétique Hiérarchique à deux niveaux (AGH)

L'AGH que nous proposons évolue sur deux niveaux :

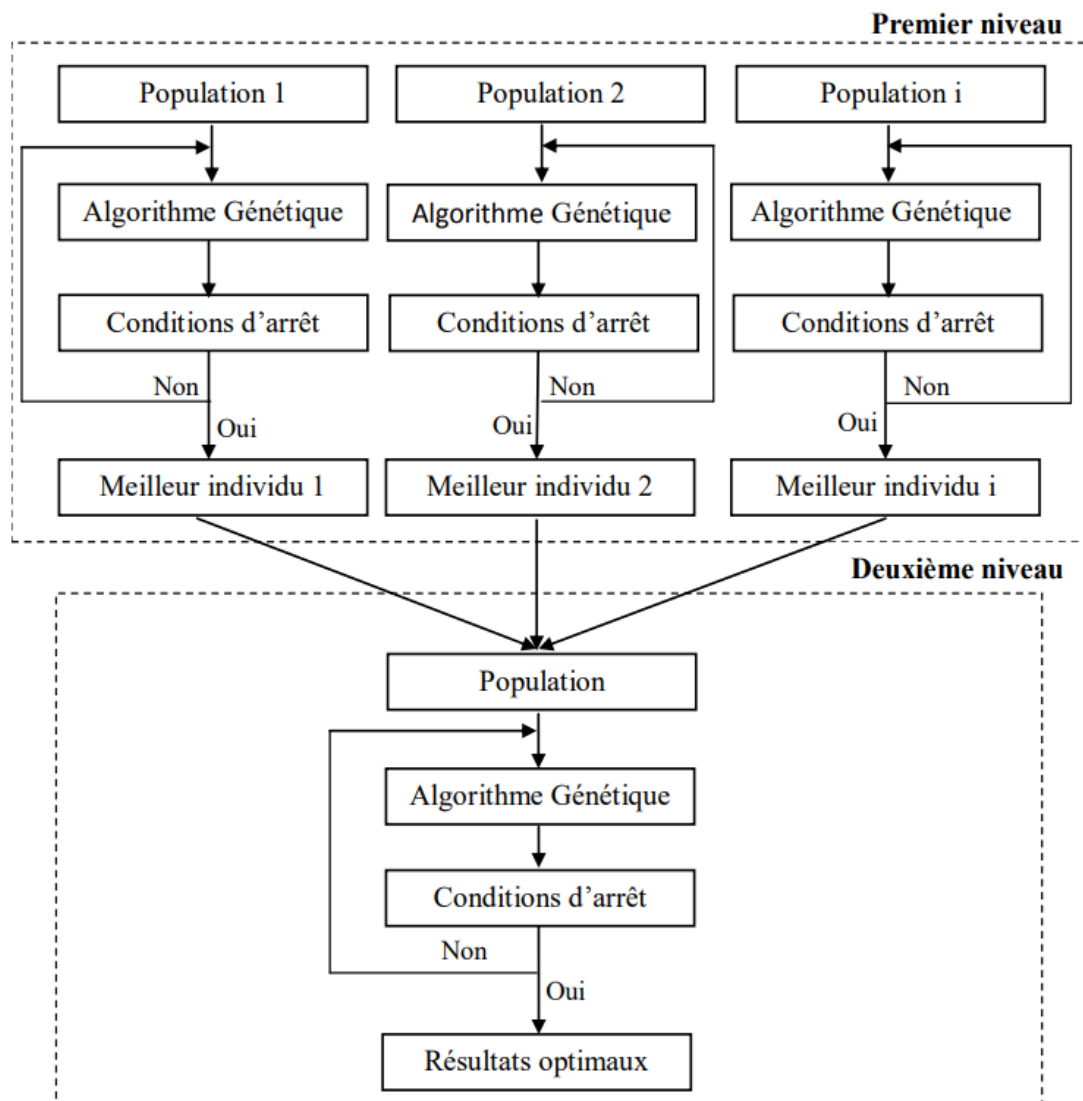
Dans le premier niveau, l'algorithme étudie parallèlement plusieurs populations en appliquant à chacune l'AG décrit auparavant. Ainsi, une fois les critères d'arrêts atteints, un meilleur individu est identifié pour chaque population et l'algorithme passe au deuxième niveau.

Le deuxième niveau, l'ensemble des meilleurs individus est ensuite regroupé dans une même population à laquelle l'AG est appliqué afin d'obtenir le meilleur individu final. Cet individu contient les valeurs de paramètres recalés.

Avantages :

Cette approche parallélisée permet de gagner considérablement en temps de calcul en exploitant au mieux les architectures informatiques modernes

constituées d'unités de calculs à processeurs multiples, multi-cœurs et multi-threads.



❖ Application au Maroc :

Dans le Maroc, comme dans le monde entier, la régulation des variables d'un réseau hydraulique telle que **la pression, le débit...etc.** est une technique qui a trop évolué dans ces dernières années puisqu'elle met en œuvre des techniques performantes qui visent l'optimisation des circuits hydrauliques de forte puissance afin de minimiser le nombre des fuites dans les installations. Cette technique est fortement utilisée dans le secteur **d'alimentation en eau potable (AEP) et d'assainissement** puisqu'elle permet d'analyser l'effet de la pression sur les fuites dans le système de distribution d'eau et être peut-être appliquée pour déterminer le débit et la pression dans le réseau et peut donc

contribuer à augmenter l'efficacité de la gestion du réseau de distribution d'eau. La méthodologie d'optimisation est basée sur la simulation hydraulique et deux modèles opérationnels reposent sur un algorithme génétique technique pour le contrôle de la pression. Ces modèles permettent d'optimiser le nombre et l'emplacement des vannes de régulation, ainsi que leurs réglages d'ouverture.

Ces techniques sont vaguement utilisées par les grandes entreprises dans le secteur hydraulique telle que L'ONEE, en fait cette méthode garantie une réduction du cout global du projet et de maintenance.

❖ **Références :**

- ★ http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2013/tleroux_genetic_algorithm/fonctionnement.html#:~:text=Les%20algorithmes%20g%C3%A9n%C3%A9tiques%20utilisent%20la,d'une%20population%20est%20unique.
- ★ https://fr.wikipedia.org/wiki/Centre_techinique_des_industries_m%C3%A9caniques
- ★ https://www.youtube.com/watch?v=ncj_hBfRt-Y
- ★ https://www.youtube.com/watch?v=3GAfjE_ChRI
- ★ <http://univ-bejaia.dz/jspui/bitstream/123456789/9892/1/R%C3%A9duction%20des%20d%C3%A9bits%20de%20fuites%20dans%20un%20r%C3%A9seau%20de%20distribution%20d'eau%20potable%20par%20l'optimisation%20du%20contrôle%20de%20la%20pression%20via%20la%20mod%C3%A9lisation%20hydraulique%20et%20les%20algorithmes%20g%C3%A9n%C3%A9tiques..pdf>
- ★ https://fr.wikipedia.org/wiki/Eau_potable_et_assainissement_au_Maroc#:~:text=En%20milieu%20rural%2C%20selon%20un,8%20%25%20%C3%A0%20partir%20de%20forages